



**О. В. Горик,  
А. А. Ландар,  
С. Б. Ковальчук,  
Г. А. Шулякський**

## **ВЗАЄМОДІЯ ІНДЕНТОРА З МЕТАЛЕВОЮ ПОВЕРХНЕЮ ПРИ ДРОБЕСТРУМЕНЕВІЙ ОБРОБЦІ**

*Викладені теоретичні пояснення взаємодії жорсткої дробинки з металевою поверхнею при косому ударі, що має місце при дробеструменевій очистці металевих поверхонь. Сформовані вихідні гіпотези аналітичної моделі торпедування жорстким індентором металевого півпростору під кутом атаки  $0 < \alpha \leq 90^\circ$ . Наведені розрахункові вирази для описання геометричних параметрів сліду дробинки на поверхні, що обробляється.*

**Ключові слова:** технологічний процес, дробеструменева очистка, індентор, модель, шорсткість, деформований півпростір.

### **Вступ**

Підготовка поверхонь інженерних конструкцій, їх елементів і окремих виробів й деталей для подальшого покриття є важливою ланкою в забезпеченні довговічності, надійності й міцності машин і механізмів у різних галузях народного господарства. Особливо значимий процес підготовки поверхонь при відновленні експлуатаційних властивостей інженерних об'єктів, їх ремонту та реконструкції. Одним із технологічних методів досягнення якісних результатів обробки й очищення поверхонь є дробеструменевий процес. Але до цього часу дробеструменева очистка поверхонь виробів є одним з найменш вивчених технологічних процесів абразивної обробки.

### **Постановка проблеми**

Проблемними питаннями дробеструменевого процесу залишаються контактні явища, механізм руйнування поверхневого шару, механіка утворення стружки, фізичні причини зносу дробу, визначення оптимальних технологічних режимів та інші. Ці питання безпосередньо пов'язані з вихідними параметрами технологічного процесу, які потребують експериментального і аналітичного дослідження.

В процесі дробеструменевого очищення металевих виробів, різноманітних поверхонь і тіл технічний дріб поступово зношується і подрібнюється, втрачаючи при цьому початковий гранулометричний склад, що призводить до зменшення висотних параметрів шорсткості оброблених поверхонь. Тому вибраний технічний дріб повинен бути достатньо міцним і твердим, щоб забезпечити високу зносостійкість абразивного матеріалу і необхідну питому продуктивність при абразивній обробці.

Окрім параметрів дробу, не менш важливими для описання процесу взаємодії дробинки з по-

верхнею, що обробляється, є швидкість і кут атаки поверхні. Ці взаємно пов'язані критерії дробеструменевого процесу не достатньо вивчені й мало описані в наукових джерелах. Звичайно, що такий стан справ є стримуючим фактором для успішного розвитку досить широко поширеного в різноманітних галузях машинобудування технологічного дробеструменевого процесу.

### **Аналіз досліджень**

Розглядаючи взаємодію абразивних частинок з металевою поверхнею при шліфуванні та зносі, дослідники пов'язують, і не безпідставно, вплив абразивних гранул на поверхню, що обробляється, з механізмом руйнування поверхневого шару. Одні автори вважають, що переважаючим механізмом руйнування є мікрорізання [1], інші надають перевагу втомному зносу [2], інші схильні до ударно-абразивного впливу [3] і так далі. На основі таких підходів розроблені різні моделі атаки дробинками здебільшого металевої поверхні, наприклад, [4–7]. Але вони стосувалися проникненню індентора по нормалі до поверхні, що обробляється.

В даній роботі викладені деякі теоретичні пояснення взаємодії жорсткої дробинки (індентора) з металевою поверхнею при косому ударі, що має місце при дробеструменевій обробці, без заглиблення в механізм руйнування поверхневого шару. Слід зазначити, що теоретичні дослідження ґрунтуються на результатах проведених експериментальних досліджень.

### **Мета і завдання досліджень**

Прийняти та обґрунтувати вихідні гіпотези руху дробинки та їх взаємодії з металевою поверхнею й, базуючись на експериментально-теоретичних результатах наукових досліджень, побудувати

модель взаємодії жорсткого індентора (дробинки) з металевою поверхнею при довільному куті атаки. В результаті розробити методику визначення окремих параметрів (режимів) дробеструменевого процесу.

### Формування гіпотез

Експериментальне вивчення під оптичним мікроскопом форми і виду слідів, залишених дробинками, на металевій поверхні свідчить про те, що торпедування жорстким індентором залишає переривисте руйнування поверхневого шару виробу, а не плавне як, наприклад, при точінні чи мікрорізанні металів. Сліди у вигляді лунок мають дещо витягнуту в напрямі атаки абразивних гранул неправильну форму.

Прийmemo припущення відносно форми сталеної колотої абсолютно жорсткої дробинки і характеру її руху після стикання з площиною, що обмежує деформований півпростір, який має пружні, в'язкі й пластичні властивості:

- кожна дробинка в перерізі є жорстким сферично подібним багатогранником, обмеженим елементарними площадками, які утворюють грані;
- окремі грані мають дефекти з утворенням загострень у вигляді різців;
- дробинки в процесі контактування з оброблювальною поверхнею здійснюють плоскопаралельний або обертальний рух в залежності від параметрів процесу дробеструменевої очистки.

Викладені припущення відносно форми і характеру руху дробинки, а також експериментальне вивчення слідів дробинки на поверхні, дозволяють прийняти такі основні моделі зіткнення жорсткої кулеподібної частинки (рис. 1), яка атакує металеву поверхню під кутом  $\alpha$  зі швидкістю  $v$ :

- одні дробинки стикаються з оброблюваною поверхнею елементарними площадками (гранями) внаслідок значної швидкості атаки перекидаються, устанавлюючись на наступну елементарну площадку (рис. 1,а);
- другі дробинки стикаються з оброблюваною поверхнею тупим кутом (ребром), перекидаються в напрямку руху, і потім, устанавлюються на одну із елементарних площадок (рис. 1,б);

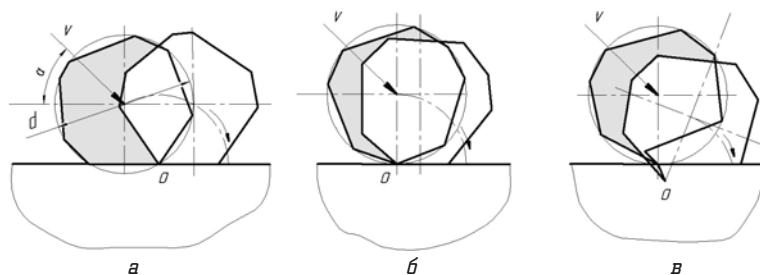


Рис. 1. Моделі зіткнення жорсткої багатогранної частинки з поверхнею металу:  $v$  — швидкість частинки;  $\alpha$  — кут атаки;  $d$  — діаметр частинки

— інші дробинки атакують поверхню гострими виступами (клинами), які врізаються в поверхневий шар на певну глибину, ламаючись і залишаючи осколок в тілі металу, продовжують рух, як і в попередніх випадках (рис. 1,в).

Отже, при стиканні з металевою поверхнею під кутом  $\alpha$  поступально рухомі колоті дробинки здійснюють обертальний рух навколо кромки контактування. Дробинки заглиблюються в поверхневий шар півпростору на глибину  $h$ , залишаючи в ньому слід певної форми, і рикошетують під кутом  $\beta$  зі швидкістю  $u$ .

Рух дробинки супроводжується пружними та пластичними деформаціями матеріалу оброблювальної поверхні.

Викладена ідеалізована модель зіткнення жорсткого сферичного багатогранного індентора з металевою поверхнею у вигляді обмеженого площиною деформованого півпростору, який має пружні, в'язкі й пластичні властивості, дозволяє уявити картину зміни параметрів руху дробу, а саме:

- нормальна до поверхні (вздовж осі  $Y$ ) складова швидкості атаки  $v_y$  внаслідок пружного опору і в'язкої текучості деформованої поверхні зменшується від початкового значення до нуля (перша фаза — фаза входу індентора);
- оброблювана поверхня деформується силою дії дробинки на певну величину  $y$ , обумовлену пружними і в'язкими властивостями поверхневого шару;
- пружно-деформована поверхня, відновлюючи свою початкову форму, відкидає дробинку в протилежному напрямку, змінюючи знак нормальної складової  $v_y$  на протилежний (друга фаза — фаза виходу індентора);
- модуль відновленої швидкості рикошетування дробинки  $u$  залежить від роботи, затраченої дробинкою на пластичне деформування оброблюваної поверхні, і фізичної здатності поверхні відновлювати свою форму;
- тангенціальна дотична до поверхні (вздовж осі  $X$ ) складова швидкості атаки  $v_x$  зменшується від початкового значення до певного кінцевого, яке обумовлене характером опору поверхневого шару переміщенню дробинки — величиною роботи, витраченої дробинкою на пластичне деформування;
- частину своєї кінетичної енергії дробинка витрачає на в'язке заглиблення і пластичне деформування (утворення лунки) на поверхні, що обробляється.

Отже, після стикання під кутом  $\alpha$  з металевою поверхнею, що обробляється, дробинка перекидаючись займає стійке положення і починає заглиблюватися в поверхневий шар, здійснюючи при цьому поступальний рух. Траєкторія руху дробинки визначається

фізико-механічними показниками поверхневого шару і є сумою траєкторій руху по нормалі до поверхні й по дотичній до неї.

### Основні співвідношення

Враховуючи досить високі температури, що виникають в зоні контактування, фізико-механічні параметри низьковуглецевих сталей, які підлягають дробеструменевій очистці і визначають нерівномірний рух дробинки по нормалі до поверхні й по дотичній до неї, приймаємо наступні фізичні моделі [4] процесу атаки півпростору: по нормалі до поверхні — в'язко-пружна модель (рис. 2), по дотичній — пружно-пластична модель (рис. 3).

Вважаємо залежності між силою впливу дробинки  $F$  на поверхню і кінематичними параметрами руху дробинки  $v_y$  та  $v_x$  лінійними.

В'язко-пружна модель (рис. 2) описує параметри деформування матеріалу оброблюваної поверхні при заглибленні дробинки по нормалі. Силкові залежності в'язко-пружної моделі визначаються наступним векторним рівнянням:

$$\vec{F}_y = \vec{F}_{y, \text{пр}} + \vec{F}_{y, \text{вязк}}, \quad (1)$$

де  $\vec{F}_y$  — нормальна (вздовж осі  $Y$ ) складова сили дії дробинки на поверхню, що обробляється;  $\vec{F}_{y, \text{пр}}$ ,  $\vec{F}_{y, \text{вязк}}$  — нормальна складова сили пружного опору матеріалу півпростору та в'язкого опору.

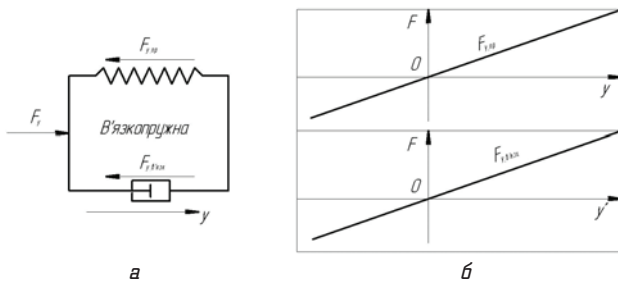


Рис. 2. Фізична модель (а) і силкові залежності (б) при русі дробинки по нормалі до оброблюваної поверхні

Пружно-пластична модель (рис. 3) характеризує поведінку матеріалу поверхні при утворенні дробинкою сліду (лунки) в поверхневому шарі

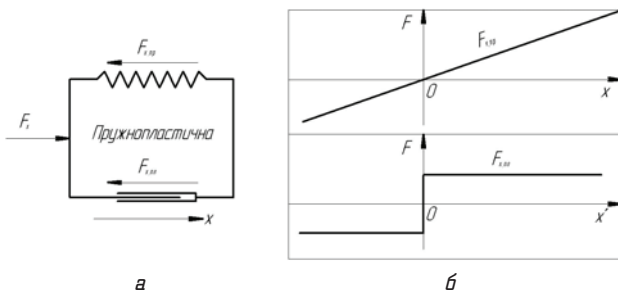


Рис. 3. Фізична модель (а) і силкові залежності (б) при русі дробинки по дотичній до оброблюваної поверхні

при заглибленні по дотичній. Силкові залежності пружно-пластичної моделі запишемо так:

$$\vec{F}_x = \vec{F}_{x, \text{пр}} + \vec{F}_{x, \text{пл}}, \quad (2)$$

де  $\vec{F}_x$  — тангенціальна (вздовж осі  $X$ ) складова сили дії дробинки на поверхню, що обробляється;  $\vec{F}_{x, \text{пр}}$ ,  $\vec{F}_{x, \text{пл}}$  — тангенціальна складова сили пружного опору матеріалу поверхневого шару та пластичного опору.

За цими моделями можна описати контактну взаємодію жорсткого сферичного багатогранника (дробинки) з металевою поверхнею в широкому діапазоні від абсолютно пружного до в'язко-пластичного удару.

На основі вищевикладеного, контактну динамічну взаємодію жорсткої сферичного індентора з деформованим півпростором при косому ударі можна описати у вигляді наступної системи рівнянь [9]:

$$\begin{cases} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{k}{m} y(t) = 0; \\ \frac{d^2 x(t)}{dt^2} - \frac{\mu k}{rm} y(t) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт тертя ковзання,  $m$  — маса тіла;  $k$  — коефіцієнт пропорційності, методика визначення якого описана нижче,  $r$  — радіус кривизни індентора.

Рішення системи рівнянь (3) дає змогу визначити з певними допущеннями основні параметри руху і дії жорсткої дробинки при зіткненні з поверхнею металевого півпростору.

Так, закони руху дробинки в часі відповідно по нормалі й по дотичній мають вигляд:

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{v_{0,y}}{q} \sin(qt), \\ x(t) &= \frac{2\mu}{r} v_{0,y} \sin^2\left(\frac{qt}{2}\right) + v_{0,x} t, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $y(t)$ ,  $x(t)$  координати траєкторії руху;  $v_{0,y}$ ,  $v_{0,x}$  — складові початкової швидкості;  $q = \sqrt{k/m}$ .

Задовольнивши відповідні граничні умови законів руху дробинки (4) знаходимо шукані параметри її взаємодії з півпростором [9], тобто з поверхнею, що обробляється. Зокрема, максимальне заглиблення дробинки в поверхневий шар виробу є таким:

$$y_{\max} = h = \left( \frac{mv_{0,y}^2}{2} \frac{2}{k} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

а максимальна сила вдавлювання в півпростір такою:

$$F_{\max} = k \left( \frac{mv_{0,y}^2}{2} \frac{2}{k} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Дотичне переміщення центру індентора у фазі його входу (заглиблення) в півпростір, коли нормальна складова швидкості  $v_y$  змінюється від початкового значення до нульового визначаємо за формулою

$$x_{\max} = \left( \frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{\mu v_{0,y}}{rq} + \frac{\pi v_{0,x}}{2q}. \quad (7)$$

Визначення геометричного тангенціального параметру сліду в фазі виходу індентора (фаза рикошетування) при зміні швидкості  $v_y$  від нуля до швидкості рикошетування  $u_y$  потребує додаткових гіпотез і встановлення відповідних граничних умов.

У вирази (5–7) входить величина  $q = \sqrt{k/m}$ , яка залежить від коефіцієнта пружно-пластичності  $k$ . Наведемо можливий, дещо відмінний від наведеного в [9], метод дослідного визначення значення сталої  $k$ , який дає можливість отримати цей коефіцієнт за результатами дослідів з довільними діаметрами сферичних інденторів.

Введемо наступну гіпотезу подібності: відношення максимального переміщення індентора пропорційне глибині залишкового еліптичного сліду (лунки), у відповідних точках, і для одного і того ж пружно-пластичного матеріалу є величиною незалежною від радіуса кривизни індентора:

$$\frac{y_{\max}}{y_{\text{пл}}} = \frac{y'_{\max}}{y'_{\text{пл}}} = \beta, \quad (8)$$

де  $y_{\max}$ ,  $y_{\text{пл}}$  — відповідно максимальне нормальне переміщення точок поверхні індентора з діаметром  $D$  та глибина залишкового сліду;  $y'_{\max}$ ,  $y'_{\text{пл}}$  — те ж саме з діаметром  $D'$ .

З урахуванням теоретичної величини максимального заглиблення  $y_{\max}$  (5), записаного через кінетичну енергію індентора  $T_0 = mv_{0,y}^2/2$ , та попереднього виразу (8), отримаємо:

$$y_{\text{пл}} = \frac{1}{\beta} \left( T_0 \frac{2}{k} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Динамічна твердість, відповідно до [5], є величиною сталою для певного матеріалу при певній швидкості деформування і вважається такою, що не залежить від діаметра індентора. В такому випадку можемо записати:

$$HD_{\text{д}} = \frac{F'_{\max}}{\pi D' y'_{\text{пл}}} = \frac{F_{\max}}{\pi D y_{\text{пл}}} = \frac{(2T_0 k)^{\frac{1}{2}}}{\pi D y_{\text{пл}}}, \quad (10)$$

оскільки,  $y_{\text{пл}} = \frac{1}{\beta} \left( T_0 \frac{2}{k} \right)^{\frac{1}{2}}$ , отримаємо:

$$HD_{\text{д}} = \frac{F'_{\max}}{\pi D' y'_{\text{пл}}} = \frac{(2T_0 k)^{\frac{1}{2}}}{\pi D \frac{1}{\beta} \left( T_0 \frac{2}{k} \right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{\beta k}{\pi D}. \quad (11)$$

З останнього виразу отримаємо співвідношення для визначення пружно-пластичного коефіцієнта  $k$  при довільному діаметрі індентора  $D$ , який у даному випадку дорівнює  $d_{\text{др}}$ :

$$k = \frac{\pi d_{\text{др}}}{\beta} HD_{\text{д}}. \quad (12)$$

З урахуванням залежності між динамічною твердістю та твердістю пластичною через коефіцієнт  $\eta_{\text{д}}$  остаточно маємо:

$$k = \frac{\pi d_{\text{др}}}{\beta} \eta_{\text{д}} HD. \quad (13)$$

Значення динамічного коефіцієнта пластичної твердості  $\eta_{\text{д}}$  для різних металів при відповідних швидкостях співудару можна знайти в [5]. Там же наведені й значення пластичної твердості  $HD$ , а також залежність переходу до гостованої твердості по Брінелю.

Сталу  $\beta$  визначимо з геометричних припущень щодо діаметру залишкового сліду (лунки)  $d_{\text{л}}$  від індентора діаметром  $D$ . Нехтуючи зміною цієї величини при дії навантаження  $F_{\max}$  та після його зняття, тобто до і після пружного відновлення матеріалу, можемо записати наступну геометричну залежність:

$$y_{\max} = 0,5(D - \sqrt{D^2 - d_{\text{л}}^2}). \quad (14)$$

З урахуванням цього коефіцієнт  $\beta$  можна визначити, маючи дослідні значення глибини залишкового сліду (лунки)  $y_{\text{пл.л}}$  та його діаметру  $d_{\text{л}}$ , за таким співвідношенням:

$$\beta = \frac{y_{\max}}{y_{\text{пл.л}}} = \frac{0,5(D - \sqrt{D^2 - d_{\text{л}}^2})}{y_{\text{пл.л}}}. \quad (15)$$

Таким чином, остаточно маємо вираз для визначення пружно-пластичного коефіцієнта  $k$  для діаметру дробу  $d_{\text{др}}$ , на основі результатів дослідів взаємодії з досліджуваною поверхнею індентора з діаметром  $D$ :

$$k = \frac{2\pi d_{\text{др}} y_{\text{пл.л}}}{D - \sqrt{D^2 - d_{\text{л}}^2}} \eta_{\text{д}} HD_{\text{д}}. \quad (16)$$

Це дозволяє реалізувати наведені залежності (4), (5), (6) для визначення окремих технічних показників взаємодії індентора з поверхнею металевого півпростору. Числові результати, отримані за цією методикою, гарно узгоджуються з експериментальними вимірами та можуть бути застосовані на практиці для визначення геометричних розмірів сліду, який залишає дробинка на металевій поверхні.

## Висновки

Проведені дослідження дають змогу на основі віхідних даних, якими є: маса дробинки  $m$ , швидкість



атаки  $\nu$ , кут атаки  $\alpha$  та коефіцієнт пропорційності  $q$ , що характеризує в'язкі та пластичні властивості оброблювального металу, визначати геометричні розміри сліду, який залишає дробинка на поверхні металу. Це, в свою чергу, дозволяє: прогнозувати параметри шорсткості поверхні; визначати продуктивність дробеструменевої обробки; розраховувати тиск дробинки на поверхню, що обробляється; будувати гіпотези відносно механізму руйнування або зміцнення поверхневого шару при дробеструменевій атаці.

### Література

1. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов [Текст] / Е. Н. Маслов. — М. : Машиностроение, 1974. — 320 с.
2. Непомнящий Е. Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц [Текст] / Е. Ф. Непомнящий // Кн.: Контактное взаимодействие и расчет сил трения и износа. — М. : Наука, 1971.
3. Виноградов В. Н. Изнашивание при ударе [Текст] / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев. — М. : Машиностроение, 1982. — 192 с.
4. Кильчевський Н. А. Теория соударения твердых тел [Текст] / Н. А. Кильчевський. — К. : Наукова думка, 1969. — 246 с.
5. Дрозд М. С. Инженерные расчеты упруго-пластической контактной деформации [Текст] / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. — М. : Машиностроение, 1986. — 224 с.
6. Горик А. В. Методика определения оптимальных параметров процесса дробеструйной очистки. Сообщение 1. Технологические режимы [Текст] / А. В. Горик, А. Н. Чернявский, А. А. Ландарь // Бетон и железобетон в Украине. — 2010. — № 6. — С. 26–31.
7. Горик А. В. Методика определения оптимальных параметров процесса дробеструйной очистки. Сообщение 2. Технические параметры [Текст] / А. В. Горик, А. Н. Чернявский, А. А. Ландарь // Бетон и железобетон в Украине. — 2011. — № 1. — С. 14–18.
8. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара [Текст] / Я. Г. Пановко. — М. : Наука, 1977. — 224 с.
9. Горик О. В. Теоретичні передумови дробеструменевої обробки поверхонь конструкційних матеріалів [Текст] / О. В. Горик, А. А. Ландар, Г. А. Шулянський // Состояние современной строительной науки-2011. Сб. науч. трудов. — Полтава : Полтавський ЦНТЭИ. — 2011. — С. 45–51.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНДЕНТОРА С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

А. В. Горик, А. А. Ландар, С. Б. Ковальчук, Г. А. Шулянський

Изложены теоретические объяснения взаимодействия жесткой дробинки с металлической поверхностью при ком ударе, что имеет место при дробеструйной очистке металлических поверхностей. Сформированы исходные гипотезы аналитической модели торпедирования жестким индентором металлического полупространства под углом атаки  $0 < \alpha \leq 90^\circ$ . Приведены расчетные выражения для описания геометрических параметров следа, оставляемого дробинкой на обрабатываемой поверхности.

**Ключевые слова:** технологический процесс, дробеструйная очистка, индентор, модель, шероховатость, деформируемое полупространство.

*Алексей Владимирович Горик, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин, Полтавская государственная аграрная академия.*

*Анатолий Антонович Ландар, кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин, Полтавская государственная аграрная академия.*

*Станислав Богданович Ковальчук, ассистент кафедры общетехнических дисциплин, Полтавская государственная аграрная академия.*

*Григорий Анатольевич Шулянський, инженер, Всеукраинское научное общество по механике разрушения, Полтавское представительство*

### THE INTERACTION OF THE INDENTER WITH A METAL SURFACE AT SHOT-BLASTING

A. Horyk, A. Landar, S. Kovalchuk, G. Shulyanskyy

Stated theoretical explanation of the interaction of hard indenter to the metal surface at an oblique impact, which takes place at purification of metal surfaces. Formed original hypothesis analytical model torpedoing rigid indenter metal half-space at an angle of attack  $0 < \alpha \leq 90^\circ$ . The following calculation expressions to describe the geometrical parameters indenter trace on the surface to be processed.

**Key words:** Technological process, indenter, model, roughness, deformable half-space.

*Alex Gorik, Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava state agrarian academy.*

*Anatoly Landar, the head is Ph. D., Professor Assistant, Poltava state agrarian academy.*

*Stanislav Kovalchuk, Assistant, Poltava state agrarian academy.*

*G. Shulyavsky, Engineer, Scientific Society of fracture mechanics*

### Адреса для листування:

36002, м. Полтава

вул. Сковороди, 1/3

Полтавська Державна аграрна академія

Тел.: 05322-2-29-81.

Факс: 05322-2-29-81.

E-mail: mech@pdaa.com.ua